

Sensor de desplazamiento angular basado en pérdidas de curvaturas de fibras ópticas

Angular displacement sensor based on bending loss of optical fiber

Mauro LOMER, Luís RODRIGUEZ-COBO, J.M. LOPEZ-HIGUERA

Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Avda. de los castros s/n

Contacto: Mauro LOMER (lomerm@unican.es).

Resumen

En este documento se presenta el estudio y la realización de un sistema sensor basado en pérdidas de curvaturas en fibra óptica multimodo y capaz de realizar las medidas del desplazamiento y movimiento angular. El principio de medida se basa en las variaciones de la potencia óptica por generación de curvatura suplementaria en la fibra con curvaturas periódicas. El transductor es realizado en dos etapas. En primer lugar, se realizan curvaturas periódicas en la fibra óptica de tipo sinusoidal embebidas en un tejido textil elástico con la finalidad de hacerlas más sensibles a las perturbaciones externas, que es adherido en la articulación exterior de un brazo mecánico móvil. En segundo lugar, el desplazamiento angular del brazo móvil produce cambios ligeros en los radios de curvaturas de la fibra por acción de la curvatura suplementaria, generando una señal óptica proporcional al desplazamiento. Los movimientos de flexión y extensión sucesivas también son registradas y cuantificadas. Los resultados experimentales son presentados y discutidos.

Palabras claves: Fibra óptica, sensor, desplazamiento y movimiento angular, pérdidas de curvatura.

Abstract

This paper presents the study and implementation of a sensor system based on bending losses in multimode optical fiber capable of taking measurements of displacement and angular motion. The measurement principle is based on the variation of optical power by generating additional curvature in the curved fiber with periodic bends. The transducer is held in two stages. First, periodic sinusoidal bends are made in optical fiber and embedded in an elastic textil baric in order to make them more sensitive to external shocks, which is attached to the outer joint of the mobile robotic arm. Secondly, the angular displacement of the mobile arm produces slight changes in the radii of curvature of fiber per share of additional curvature proportional to displacement. Flexion and extension successive are also recorded and quantified. The experimental results are presented and discussed.

Key words: optical fibers, sensor, displacement and angular motion, bending losses.

1.- Introducción

Con la finalidad de controlar los procesos de rehabilitación clínica de los pacientes se han estudiado y desarrollado diversos dispositivos basados en diferentes principios físicos. En el caso de la rehabilitación de las extremidades (brazos y piernas) se requiere, por ejemplo, la cuantificación y el control del movimiento angular de la flexión y extensión. Las técnicas ópticas utilizadas en estos casos se encuentran poco desarrolladas, las primeras propuestas fueron desarrolladas en 1993 por Louis et al., [1]. El sensor propuesto se basaba en la variación de las pérdidas de transmisión por curvaturas en fibra óptica multimodo adaptada al brazo por acción del movimiento de flexión y extensión. En este caso la fibra óptica estaba dispuesta en forma recta sobre el brazo extendido. Por acción de la flexión se provocaba una curvatura en la fibra y por tanto se generaba una señal, pero las variaciones de la intensidad óptica eran muy débiles. Recientemente, otras mejoras con fibras ópticas han sido introducidas por Lee et al., y Birlo et al., [2-3]. En los dos casos la fibra es pulida lateralmente con la finalidad de aumentar la sensibilidad de la medida. Pero utilizar fibras ópticas pulidas lateralmente puede introducir errores en la medida de los sensores debidos a la exposición al medio ambiente, además son poco durables. Trabajos de integración de las fibras ópticas en tejidos textiles han sido propuestos para aplicaciones en iluminación [4] y en medicina [5]. Todos los trabajos reportados anteriormente utilizan fibras ópticas plásticas (POF), mostrando que tienen propiedades de adaptabilidad y flexibilidad para ser integrados en sistemas sensores portables y de bajo coste.

En este documento se presenta un sensor de medida del movimiento angular basado en curvaturas permanentes de fibras ópticas plásticas embebidas en el tejido textil elástico y curvaturas adicionales debidos al movimiento de flexión y extensión de las articulaciones del cuerpo humano (manos, brazos y piernas). Los movimientos de las articulaciones generan variaciones en la intensidad óptica transmitida por la fibra y son proporcionales al movimiento angular. Una unidad optoelectrónica puede detectar estas varia-

ciones y cuantificar la cantidad de movimiento. Se presentan los resultados experimentales y la discusión del sensor propuesto.

2.- Teoría y concepto del sensor

Las pérdidas por curvaturas en las fibras ópticas han sido ampliamente estudiadas por varios autores desde 1970 en fibras monomodos y multimodos, y con perfiles a salto de índice y a gradiente de índice [6-8]. Los estudios reportados se han basado en aproximaciones electromagnéticas en los casos de fibras monomodo o fibras multimodo con pocos modos propagados, mientras que en las fibras de gran diámetro de núcleo, la aproximación geométrica es suficiente. Las curvaturas en las fibras ópticas hacen que sean más sensibles a la influencia del medio exterior. Esto ha dado lugar a numerosas aplicaciones en sensores, tales como la medida de nivel de líquido, desplazamiento, humedad y temperatura entre otros [9-11]. En el presente trabajo se utilizan las variaciones de las pérdidas de curvatura de la fibra óptica multimodo como medio de generación de señal óptica proporcional al movimiento angular. En resumen, los conceptos sobre las pérdidas de curvaturas en las fibras ópticas utilizadas en el sensor propuesto son los siguientes:

- Las pérdidas totales por efecto de curvatura en la fibra se componen de dos partes: pérdidas de transición y pérdidas puras de curvatura. Las pérdidas de transición son las más importantes y se producen cuando los rayos luz pasan de la región recta a la región curvada de la fibra [7].
- Para una fibra óptica, las pérdidas de curvatura son proporcionales al radio de curvatura; las pérdidas son más importantes cuando el radio de curvatura es más débil. Elegimos radios débiles porque son más sensibles a las perturbaciones exteriores (típicamente inferior a 10 mm) [9].
- Las pérdidas de propagación en la fibra debidas al material son consideradas despreciables en las regiones curvadas debido a que la longitud de la fibra óptica utilizada es pequeña (unas decenas de cm).

- En las fibras ópticas de plástico, de 0,98 mm de diámetro de núcleo, se pueden propagar varios millones de modos utilizando luz visible, por lo que las características de propagación son calculadas utilizando la aproximación geométrica.

Con estos conceptos, podemos generar curvaturas periódicas en la fibra e implantarlas en un tejido elástico, por ejemplo. Así, en reposo se tiene un nivel de intensidad óptica con pérdidas constantes, pero será más sensible a la perturbación exterior, ya sea por presión aplicada perpendicularmente a la superficie del tejido elástico, por estirado longitudinal o curvando el tejido. Con estas acciones se aumentan ligeramente los radios de curvaturas con relación a las curvaturas en reposo, generándose por tanto una señal óptica que puede ser detectada por un fotodetector ubicada en la extremidad de salida de la fibra. Además, si el conjunto, tejido elástico y fibra con curvaturas, es emplazado en el centro de una articulación móvil, podrá medir el movimiento angular con acciones de flexión y extensión.

3.- Construcción del transductor

En la Fig. 1 se muestra el principio de funcionamiento de la medida angular. El tejido textil elástico, conteniendo la fibra óptica con las curvaturas, está ubicado en la región exterior de la articulación de un brazo mecánico giratorio. El brazo en extensión representa la posición de reposo y constituye la referencia de la medida; en flexión el brazo gira angularmente y la variación de la potencia óptica transmitida por la fibra es proporcional al desplazamiento. En un movimiento de flexión y extensión sucesivas, se generan variaciones periódicas de la intensidad óptica. De esta señal, y conociendo el desplazamiento, se puede extraer la velocidad del movimiento. Las características de la fibra óptica de plástico utilizada en el presente trabajo son mostradas en la Tabla 1. Se han realizado varios transductores con diferentes radios de curvaturas. Se presentan los resultados obtenidos con radios de curvaturas de 5,5 mm por ser los que presentan la mayor sensibilidad al desplazamiento angular.

Las curvaturas generadas en las fibras son embebidas en una banda textil elástica, tal como la mostrada en la Fig. 2.

Se han realizado 4 periodos de curvaturas con radios de curvatura de 5,5 mm embebidos sobre una longitud de 95 mm. La altura de las curvaturas es de 20 mm y la extensión total de la banda elástica es de 260 mm. Cuando los extremos de esta banda elástica son fijados sobre el brazo articulado, por acción del movimiento angular sufre elongación, estirándose unas decenas de milímetros. Esta acción a su vez desplaza las fibras de su posición de reposo.

Tabla 1. Parámetros de POF (ESKA™ GK-40)

Diámetro del núcleo	0,98 mm
Diámetro de la cubierta	1,00 mm
Índice de refracción núcleo	1,49
Apertura numérica	0,5
Atenuación (650 nm)	0,15 dB/m

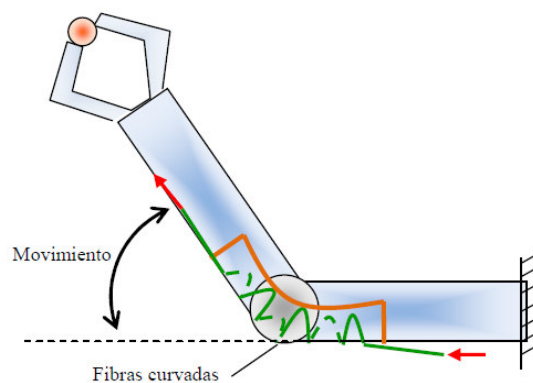


Fig. 1. Principio de la medida angular sobre un brazo mecánico articulado.

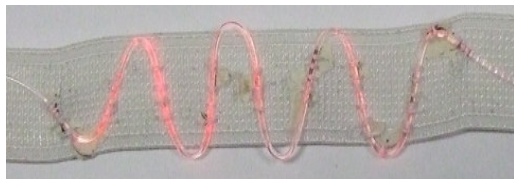


Fig. 2. Curvaturas periódicas de fibra óptica de plástico embebida en banda textil elástica.

En la Fig. 3, se muestra el esquema del sistema sensor para la medida angular. La luz proveniente de la fuente es inyectada en la fibra óptica y luego dividida en otras dos señales a través de un acoplador, una para realizar la medida de los movimientos angulares a través de la curvaturas transductor), y el otro hace de referencia. Ambas señales son detectadas por fotodetectores y tratadas con la finalidad de evitar errores en la medida debida a las variaciones de potencia óptica de la fuente de luz. Con la finalidad de evitar el ruido de la luz ambiente, la fuente de luz es modulada en frecuencia. En la detección de la señal se ha incluido un filtro pasa-banda de igual frecuencia.

4.- Resultados y discusión

A partir de la posición de reposo (en extensión) del brazo articulado con el transductor construido y descrito en el apartado 3, se ha procedido a realizar las medidas experimentales, primero de desplazamiento angular y luego en movimiento de flexión y extensión. Las medidas han sido realizadas utilizando una fuente láser He-Ne ($\lambda=0,632.8\mu\text{m}$), modulada a 270 Hz, y un medidor de potencia óptica (Anritsu Corp.). Para las medidas de movimiento angular, se ha extraído la señal en voltios del medidor de potencia, y a continuación se ha digitalizado la señal analógica con el sistema de adquisición NI-USB-6009 de National Instruments, con una frecuencia de muestreo de $F_s=1000$ muestras por segundo. A estos datos se les aplica un filtrado paso bajo (Filtro Butterworth de orden 15 de frecuencia normalizada 0.1). A continuación, se aplica un filtro de media móvil con un tamaño de ventana $N=500$ muestras.

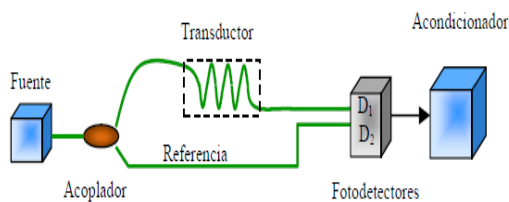
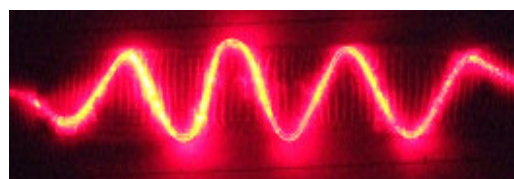


Fig. 3. Esquema del sistema sensor

En la Fig. 4 se muestra una vista de la elongación lineal de la cinta elástica conteniendo las fibras curvadas, en reposo y en elongación de 40 mm. Se observa que las curvaturas en la fibra se desplazan ligeramente de su posición de reposo, los radios de curvatura de la fibra cambian, por tanto, hay una variación de la luz transmitida. En la Fig. 5 se muestra la curva de variación de la potencia óptica (en dB) en función del estirado lineal de la banda elástica. La acción de estirado de 0 a 30 mm hacen que las pérdidas aumentan linealmente (variación de 1,4 dB), de 30 a 40 mm la variación es mínima.



(a) En reposo



(b) Estirado

Fig. 4. Banda textil elástica conteniendo las fibras ópticas curvadas en (a) posición de reposo y (b) estirado linealmente 40 mm.

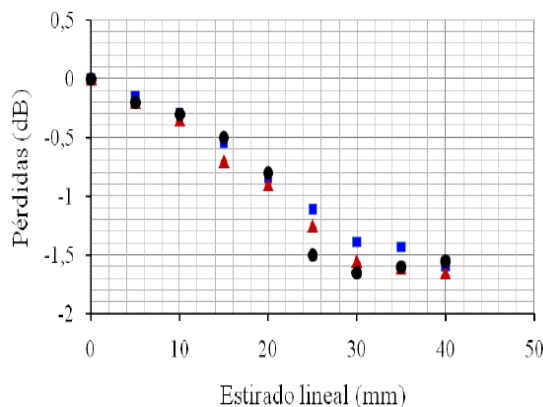


Fig. 5. Variación de potencia óptica transmitida en la fibra en función al estirado lineal de la banda textil elástica.

La medida de desplazamiento angular es realizada emplazando el transductor en la articulación del brazo mecánico de la Fig.1 y girando uno de sus brazos. En reposo, la región central del transductor se encuentra tangencialmente a la superficie lateral de un cilindro de geometría circular. El radio de la sección del cilindro constituye el radio de la curvatura adicional a las curvaturas de la fibra. Si las curvaturas en la fibra inicial se encuentran en el plano de la banda textil elástica, el desplazamiento angular del brazo mecánico provoca una curvatura adicional del plano de la fibra curvada. La flexibilidad de la banda elástica hace que se desplacen los radios de curvaturas de la fibra embebida. En la Fig. 6 se muestra la curva de variación de la potencia óptica transmitida en la fibra en función del desplazamiento angular utilizando un radio de curvatura de 25 mm. Esta curva presenta dos regiones, una variación lineal de potencia de 0 a 80° (alrededor de 1 dB) y una región casi estable de mínimas variaciones de potencia óptica entre 80 y 150° (alrededor de 0,1 dB). La acción de flexión y extensión presentan mínima histéresis en la curva y resultados obtenidos son repetitivos.

En la Fig. 7 se muestra el resultado de los movimientos sucesivos de flexión y extensión expresados en la variación de la tensión eléctrica en función del tiempo. El desplazamiento angular se hace aproximadamente de 0 a 100° con intervalos de 5

segundos, y con una variación de la amplitud de 35 mV.

De los resultados experimentales obtenidos, se observan bien que el desplazamiento angular tiene una relación con las variaciones de la potencia óptica transmitida por la fibra. Es evidente que la sensibilidad de la medida depende del radio de curvatura de la fibra embebida. En el presente trabajo se ha utilizado un radio de 5,5 mm, por lo que en futuros trabajos se estudiarán otros radios de curvatura. Por el momento se ha logrado una variación casi lineal en el rango de 0 a 90°, por lo que nuestro objetivo será llegar hasta 150° de rango de medida angular. La gran flexibilidad de la POF es una ventaja con relación a la fibra de vidrio. En el presente trabajo se ha utilizado fibras POF de 1 milímetro de diámetro, pero existen comercialmente fibras POF con diámetros de 125 μm , por lo que su integración en superficies más reducidas de bandas textiles elásticas puede ser factible. Por tanto la solución propuesta mejora los estudios realizados en las referencias [1-3] al obtener una mayor sensibilidad con montaje simple, además de ser de bajo coste.

Futuros trabajos incluyen la aplicación práctica del sensor propuesto en aplicaciones médicas y deportivas, donde pueden ser muy útiles las medidas del desplazamiento y el movimiento angular.

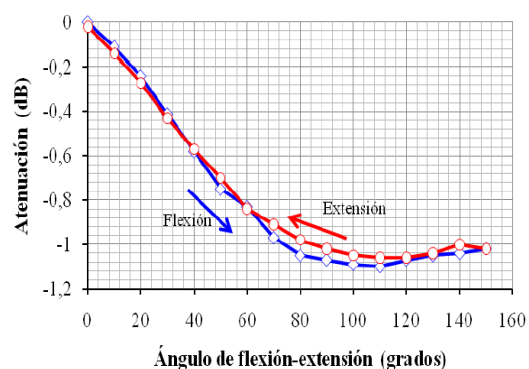


Fig. 6. Variación de la potencia óptica transmitida en función al desplazamiento angular.

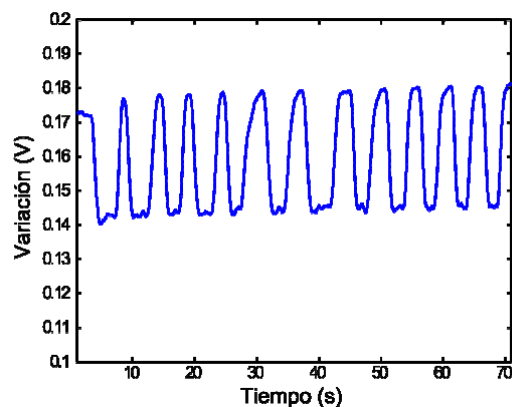


Fig. 7. Medida de movimiento angular de flexión-extensión del brazo articulado (Voltios vs. Tiempo).

4.- Conclusión

Se ha realizado un sensor de desplazamiento angular basado en las pérdidas de curvaturas en la fibra óptica. Las curvas periódicas de la fibra óptica embebidas en una banda textil elástica aumentan la sensibilidad del sensor a la perturbación exterior. Cuando el transductor es adherido en la articulación de un brazo mecánico genera pérdidas adicionales que son proporcionales al desplazamiento angular. Los movimientos de flexión-extensión son medidos en forma periódica y pueden ser cuantificados. Las aplicaciones del sensor, además de los robots, podrían ser utilizados en el control de rehabilitación médica de las extremidades, manos, piernas o brazos.

Agradecimiento: Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología por su apoyo al presente trabajo mediante el proyecto TEC2007-67987-C02.

Referencias

[1] V. Louis, P. Le-Huy, M. Abignoli, Y. Granjon, "Optical fiber based sensor for angular measurement in rehabilitation", *Proc. Int. Conf. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 5, pp 153-157, 1993

[2] K. Lee and D.S. Kwon, "Wearable master device for spinal injured persons as a control device for motorized wheelchairs", *Artif. Life Robotics*, 4, pp. 182-187, 2001.

[3] L. Birlo, J.G. Oliveira, J.L. Pinto and R.N. Nogueira, "A reliable low-cost wireless and wearable gait monitoring system based on a plastic optical fibre sensor", *Meas. Sci. Technol.* 22, 045801, 2011.

[4] A. Harlin, H. Myllymaki, and K. Graham, "Polymeric optical fibres and future prospects in textile integration", *Autex Research J.* 2, 132-143, 2002.

[5] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt, M. Schukar, K. Krebber, F. Pirote, and A. Depre, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring", *IEEE Sensor J.* 8, 1215-1222, 2008.

[6] E.A.J. Marcatili, "Bend in optical dielectric guides", *Bell System. Tech. J.*, 48, 2103-2132, 1969.

[7] D. Gloge, "Bending loss in multimode fibers with graded and ungraded core index", *Applied Optics*, 11, 2506-2513, 1972.

[8] A.W. Snyder and J.D. Love, *Optical Waveguide Theory*, Chapman and Hall, London 1983.

[9] M. Lomer, A. Quintela, M. Lopez-Amo, J. Zubia and J.M. Lopez-Higuera, *Meas. Sci. Technol.* 18, 2216-2267, 2007.

[10] C.M. Tay, K.M. Tan, S.C. Chan, H. Rajhardjo, "Humidity sensing using plastic optical fibers", *Microwave and Optical Technology Letters*, 43, 387-390, 2004.

[11] M. Remouche, R. Mokdad, M. Lahrashe, A. Chakari, and P. Meyrueis, "Intrinsic optical fiber temperature sensor operating by modulation of the local numerical aperture", *Optical Engineering*, 46, 024401-15, 2007.